中国生态农业学报 2017 年 9 月 第 25 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2017, 25(9): 1298−1305

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170457

曹殿云, 王宏伟, 徐晓旭. 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1298−1305
Cao D Y, Wang H W, Xu X X. Effect of sulfur on nitrogen/sulfur uptake/distribution and yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco- Agriculture, 2017, 25(9): 1298−1305

硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响*

曹殿云, 王宏伟**, 徐晓旭

(沈阳农业大学特种玉米研究所 沈阳 110866)

摘 要: 为明确硫肥用量在作物增产方面的效应, 本研究采用单因素随机区组设计, 通过大田试验, 设置 5 个硫肥(硫磺)用量, 分别为 0 kg(S)·hm^{-2}(S0)、40 kg(S)·hm^{-2}(S1)、80 kg(S)·hm^{-2}(S2)、120 kg(S)·hm^{-2}(S3)和 160 kg(S)·hm^{-2}(S4), 研究不同硫肥用量对玉米产量和氮硫素吸收、分配的影响。结果表明, 施用硫肥可使玉米产量增加 7.0%~18.1%, S2 处理玉米产量最高, 为 12 978.30 kg·hm^{-2}。施用硫肥能显著提高玉米各生育时期(除大喇叭口期外)植株干物质积累量。成熟期, 玉米叶片、叶鞘、籽粒干物质积累量均在 S2 处理下达最大值, 玉米茎秆、苞叶、穗轴干物质积累量均在 S1 处理下达最大值。整个生育期内, 玉米硫素积累量和硫素吸收强度均在 S2 处理下达最大值, 且显著高于不施硫的 S0 处理。成熟期时, 玉米叶片硫素积累量随施硫量的增加而增加, S4 处理时达最大值; 玉米茎秆、苞叶、穗轴硫素积累量均在 S1 处理下最大; 玉米叶鞘和籽粒硫素积累量则 S2 处理下最大。从拔节期至抽雄吐丝期, S3 处理促进玉米氮素积累效果最佳; 灌浆期和成熟期分别以 S1 和 S2 处理更有助于玉米氮素积累。施硫量的增加会在一定程度上降低玉米硫肥偏生产力和硫肥利用率; 玉米硫肥农学利用率在 S2 处理下最大。玉米植株的氮素和硫素吸收累积量具有极显著相关关系。因此, 适量的硫肥在提高玉米产量和氮硫吸收、分配及利用效率方面发挥着重要作用, 施硫量为 80 kg(S)·hm^{-2} 时, 整体效果最佳。

关键词: 玉米; 硫肥; 氮; 积累量; 吸收强度; 利用率; 产量
中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)09-1298-08

Effect of sulfur on nitrogen/sulfur uptake/distribution and yield of maize*

CAO Dianyun, WANG Hongwei**, XU Xiaoxu

(Special Maize Institute, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: For an in-depth understanding of the effects of sulfur on crop yield improvement, a field experiment was conducted to determine the effects of sulfur application on the absorption and distribution of both nitrogen and sulfur in the 'Zhengdang-958' maize cultivar. To that end, a single factor randomized block design was set up in the experiment with five levels of sulfur — 0 kg·hm^{-2}, 40 kg·hm^{-2}, 80 kg·hm^{-2}, 120 kg·hm^{-2} and 160 kg·hm^{-2}. The results showed that the application of sulfur increased the yield of maize within the range of 7.0%–18.1%. When the application of sulfur was 80 kg·hm^{-2}, the yield of maize reached the highest level (12 978.30 kg·hm^{-2}). Also dry matter accumulation in maize increased significantly through the application of sulfur, with the peak value under 80 kg·hm^{-2} at all growth stage except for the big trumpet stage. Dry matter accumulation in leaf, leaf sheath and grain weight were also the highest in 80 kg·hm^{-2} sulfur treatment among different sulfur application levels at the mature stage. However, the dry matter accumulation in maize stem, bract and cob were the maximum

* 国家科技计划课题(2013BAD07B03)和国家科技支撑计划项目(2014BAD01B01)资助
** 通讯作者: 王宏伟, 研究方向为玉米高产栽培生理。E-mail: whw741119@163.com
曹殿云, 研究方向为玉米高产栽培生理。E-mail: dianyuncao@126.com
收稿日期: 2017-05-16 接受日期: 2017-06-24

* This work was supported by the National Science and Technology Plan Project of China (2013BAD07B03) and the National Key Technology R&D Program of China (2014BAD01B01).
** Corresponding author, E-mail: whw741119@163.com
Received May 16, 2017; accepted Jun. 24, 2017

under sulfur application level of 40 kg·hm^{-2}. Sulfur absorption and accumulation in maize was the maximum at each growth period under sulfur dose of 80 kg·hm^{-2}, which was significantly higher than that under sulfur dose of 0 kg·hm^{-2}. Sulfur content in maize leaf increased with increasing sulfur application level. The sulfur accumulation in corn stalk, bract and cob were highest under sulfur application level of 40 kg·hm^{-2} whereas those in maize leaf sheath and grain were highest under sulfur application level of 80 kg·hm^{-2}. Nitrogen accumulation in maize was highest from jointing to the silking stage when sulfur dose was 120 kg·hm^{-2}. But at maize grain-filling and maturity stages, the nitrogen accumulation reached the peak points under 40 kg·hm^{-2} and 80 kg·hm^{-2} levels application, respectively. Sulfur partial productivity and use productivity decreased with increasing sulfur application level. When sulfur dose was 40 kg·hm^{-2}, sulfur partial productivity and use productivity reached the highest values. The agronomic efficiency of sulfur was largest under sulfur dose of 80 kg·hm^{-2}. Sulfur accumulation was positively correlated with nitrogen accumulation. In conclusion, fertilization using sulfur (at 40–120 kg·hm^{-2}) had high yield and fertilizer use efficiency. All in all, sulfur application was critical for nitrogen and sulfur uptake, distribution and use efficiency of maize. The overall effect was best under sulfur application level of 80 kg·hm^{-2}.
Keywords: Maize; Sulfur fertilizer; Nitrogen; Accumulation amount; Absorption intensity; Use efficiency; Yield

硫是继氮、磷、钾之后的第4位作物必需营养元素[1]。近年来，由于高纯度复合肥的长期利用忽略了硫肥的补充，造成土壤中硫素含量下降，致使土壤中硫素缺乏的问题逐渐显现[2]。与氮磷钾肥相比，硫肥对作物生长发育影响的研究相对较少。玉米(*Zea mays* L.)是大量需氮作物，但由于氮硫交互效应的存在，玉米生长发育对氮素需求的增加会加剧玉米对硫素的需求[3-4]。硫和氮素在植株体内的生理功能和同化途径相似，氮、硫中的一种元素缺乏会抑制另一种元素的吸收和同化[5]。当氮肥供应充足的情况下，植物对硫肥的响应会更加敏感[6]。施用硫肥能够提高玉米干物质的积累量，同时提高玉米植株氮、硫元素的含量[7]。研究表明随着玉米生育进程的不断推进，秸秆硫素含量逐渐下降，籽粒硫素含量逐渐增加[5]。在正常供氮水平下，施用硫肥能够促进小麦(*Triticum aestivum* L.)生物量增长、氮素总转运量及营养体氮素对籽粒的贡献率[8]。刘松忠等[9-10]研究认为作物地上部氮素含量与硫供应水平相关性不显著，但硫含量与供硫水平存在一定正相关关系。施用硫肥能够增加作物对氮、硫素的吸收，提高作物植株全硫、全氮含量；但是，过量施用硫肥可能会导致植株硫含量下降。施硫可促进作物对氮素的吸收，施氮也可改善作物对硫肥的利用[11-12]。平衡施用氮、硫可以促进作物对氮、硫的协同吸收，降低作物器官氮硫比，有效减少氨挥发以及氮素淋溶损失，提高作物对肥料的利用率[13-14]。以往的研究多是在氮、硫互作条件下研究作物对氮、硫元素的吸收和分配，而在常规施肥条件下，配施不同水平的硫肥对作物氮、硫素吸收及分配影响的研究相对较少。目前，硫、氮互作的相关研究多集中在小麦、大豆(*Glycine max* L.)等作物上，而对玉米的相关研究较少。本试验设置在玉米常年连作的辽宁省海城市(辽南地区)，由于生产田常年采用一次性施入长效复合肥的施肥方式，导致生产田土壤养分严重失衡。经测定，试验土壤中有效氮含量为104 mg·kg^{-1}、有效磷含量为116.52 mg·kg^{-1}、速效钾98.52 mg·kg^{-1}、有效硫含量为16.27 mg·kg^{-1}。说明，供试地块土壤中硫素含量相对匮乏，我们推断硫素缺乏是限制玉米产量潜力的重要原因。因此，本试验结合当地常规施肥方式，配以施用不同水平的硫肥，以探究硫肥对玉米不同生育时期硫素、氮素的吸收和积累，以及成熟期时元素在玉米各器官分配的影响，以便为合理施用硫肥、充分发挥氮硫交互效应提供参考，为减少化肥投入，提高资源利用效率，实现玉米的高产高效栽培提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

该试验于2015年在辽宁省海城市(40°53′N, 22°43′E)进行，年平均气温10.4 ℃，当季降雨总量为390.6 mm。供试土壤为棕壤，0~20 cm土壤耕层的养分含量为全氮1.32 g·kg^{-1}，碱解氮104 mg·kg^{-1}，速效磷116.52 mg·kg^{-1}，速效钾98.52 mg·kg^{-1}，有效硫16.27 mg·kg^{-1}。当地常年采用玉米连作的栽培模式，施肥方式为播种时一次性施入长效复合肥675 kg·hm^{-2}(N∶P_2O_5∶K_2O为28∶12∶12)后期不再追肥。

1.2　试验设计

采用单因素随机区组设计，硫肥(硫磺)用量设5个水平，分别为0 kg(S)·hm^{-2}(S0)、40 kg(S)·hm^{-2}(S1)、80 kg(S)·hm^{-2}(S2)、120 kg(S)·hm^{-2}(S3)、160 kg(S)·hm^{-2}(S4)。各小区均施用复合肥 675 kg·hm^{-2}(N∶P_2O_5∶K_2O 为 28∶12∶12)，所有肥料均在播种时一次性施入。供试玉米品种为'郑单958'，种植密度为67 500株·hm^{-2}，种植方式为 8 行区，行长 5 m，行距 0.56 m，小区面积

22.4 m^2, 3 次重复。田间管理同当地生产田。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 干物质积累量的测定

于拔节期(出苗后51 d)、大喇叭口期(出苗后68 d)、抽雄吐丝期(出苗后90 d)、灌浆期(出苗后109 d)、成熟期(出苗后135 d), 每个处理随机选取代表性植株3株, 成熟期按茎、叶、鞘、苞叶、穗轴、籽粒分器官置105 ℃烘箱中杀青30 min, 80 ℃烘至恒重称干重。作为样品分析计算干物质积累量、氮素积累量、硫素积累量。

1.3.2 植株氮、硫含量的测定

植株氮含量先用H_2SO_4-H_2O_2消煮, 利用半微量凯氏定氮法, 采用FOSS KJELTEC 8100全自动定氮仪测定。植株硫含量采用HNO_3-$HClO_4$-HCL消煮, 用ICP-7500A等离子体质谱仪测定。

1.3.3 产量测定

完全成熟后收获中间4行玉米, 以含水量14%的重量折算小区产量。

1.4 数据分析

硫(氮)素吸收强度($g\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$)=群体净吸收量($g\cdot hm^{-2}$)/各生育期的生长时间(d) (1)

硫肥偏生产力=施硫区籽粒产量/硫肥用量 (2)

硫肥利用率=(施硫区硫素吸收量−不施硫区硫素吸收量)×100%/硫肥用量 (3)

硫肥农学利用率=(施硫区籽粒产量−不施硫区籽粒产量)/硫肥用量 (4)

试验数据采用Microsoft Excel 2003与SPSS 13.0软件进行方差分析和显著性检验。采用Sigmaplot 12.0进行作图。

2 结果与分析

2.1 施用硫肥对玉米干物质积累和分配的影响

由表 1 可知, 拔节期时, 施用硫肥能显著提高玉米地上部干物质积累量, 但各施硫处理间差异不显著。大喇叭口期至成熟期, 随着施硫量的增加玉米地上部干物质积累量呈先增加后减小的变化趋势。抽雄吐丝期至成熟期均为 S2 处理下地上部干物质积累量最大, 且显著高于其他处理。各生育时期地上部干物质积累量均以 S4 处理最小, 并且在抽雄吐丝期和灌浆期显著低于 S0 处理。成熟期各部位干物质积累量表现为籽粒>茎秆>叶鞘>叶片>穗轴>苞叶, 玉米叶片干物质积累量随着施硫量的增加呈增加趋势, S4 处理达最大值。玉米叶鞘、茎秆、穗轴、籽粒干物质积累量均随着施硫量的增加呈先增加后减少的变化趋势。施用硫肥对玉米苞叶干物质积累量无显著影响。

2.2 施用硫肥对玉米硫素吸收和分配的影响

由表 2 可知, 各生育时期随着施硫量的增加玉米硫素积累量均呈单峰曲线的变化规律, 各生育时期均为 S2 处理下玉米硫素积累量最大。拔节期至大喇叭口期各施硫处理硫素积累量表现为S2>S3>S1>S0>S4, 抽雄吐丝期表现为S2>S1>S3>S0>S4, 灌浆期至成熟期表现为S2>S1>S3>S4>S0。成熟期, 玉米各部位硫素积累量大体表现为: 籽粒>叶片>茎秆>叶鞘>苞叶>穗轴。叶片硫素积累量随着施硫量的增加而增加, S4 处理玉米叶片硫素积累量最大; 叶鞘、茎秆、苞叶、籽粒硫素积累量均随着施硫量的增加呈先增加后减小的趋势, S2 处理下达到最大值; 穗轴在 S1 处理下硫素积累量最大。

施硫处理对玉米硫素吸收有显著影响(表 3)。各施硫处理硫素吸收强度在整个生育期出现两个高峰, 分别为拔节期和抽雄吐丝期。拔节期至抽雄吐丝期, 各处理玉米硫素吸收强度大小表现为S2>S3>S1>S0>S4, 灌浆期表现为 S2>S1>S3>S4>S0, 成熟期为 S2>S1>S3>S0>S4。从各施硫处理总体比较看来, 各生育时期均以施硫量 80 $kg\cdot hm^{-2}$(S2 处理)最有利于玉米硫素的吸收。施硫量为 160 $kg\cdot hm^{-2}$ 玉米硫素吸收量和吸收强度均表现较小。表明适当施用硫肥能够促进玉米硫素吸收强度, 但过量施用硫肥会抑制硫素的吸收。

2.3 施用硫肥对玉米氮素吸收和分配的影响

由表 4 可以看出, 适当施用硫肥能显著提高玉米全氮积累量, 且随着施硫量的增加玉米氮素积累量呈先增加后下降的变化趋势。拔节期—抽雄吐丝期均以 S3 处理玉米氮素积累量最大, 较 S0 处理分别高 12.40%、64.45%、37.23%; 灌浆期以 S1 处理最大, 较 S0 处理高 21.43%; 成熟期时, S2 处理最大, 较 S0 处理高 42.23%, 均达差异显著水平($P<0.05$)。成熟期时, 玉米各部位氮素积累量与硫素积累量大小表现一致, 玉米叶片、叶鞘、茎秆、籽粒氮素积累量均在 S2 处理下达到最大值, 苞叶氮素积累量在 S3 处理下达到最大值, 穗轴在 S1 处理下达到最大值, 且均显著高于其他处理。由表 5 可以看出, 拔节期至抽雄吐丝期, 当施硫量为 80 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 120 $kg\cdot hm^{-2}$(S2 和 S3 处理)时, 玉米氮素吸收强度较大, 且显著高于其他处理, 灌浆期至成熟期时, 施硫量为 40 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 80 $kg\cdot hm^{-2}$(S1 和 S2 处理)时玉米氮素吸收强度最大, 并显著高于其他处理。

表 1　硫肥用量对玉米不同生育时期地上部干物质积累和分配的影响

Table 1　Effect of sulfur application amount on shoot dry matter accumulation and redistribution of maize at different growth stages　　kg·hm^{-2}

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Large bell stage	抽雄吐丝期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage						
					叶片 Blade	叶鞘 Sheath	茎秆 Stem	苞叶 Husk	穗轴 Spike-stalk	籽粒 Grain	总量 Total
S0	3 172.50±93.73b	6 075.55±48.23c	11 475.80±881.75c	19 575.75±997.23a	2 903.50±110.26c	2 700.75±115.35c	3 375.85±81.25e	1 350.75±132.86a	1 350.85±73.35c	9 268.85±182.35d	21 127.55±345.55b
S1	3 375.15±188.20a	5 400.45±146.42d	13 500.75±321.60b	20 250.85±875.66a	2 497.25±67.35e	3 240.85±125.35b	4 522.5±110.88a	1 147.85±24.55a	1 822.55±83.25a	9 305.55±128.85cd	23 355.65±768.95ab
S2	3 375.50±48.23a	6 750.35±140.65b	14 850.55±324.65a	20 250.90±345.45a	3 105.45±140.23b	3 462.95±87.95a	4 050.95±73.45b	1 147.50±49.85a	1 620.33±104.45b	12 202.66±235.25a	24 495.65±953.25a
S3	3 375.50±312.12a	7 425.68±207.55a	12 825.90±132.32b	20 250.45±652.25a	2 835.65±133.45d	2 345.55±117.25d	3 847.55±78.55c	1 147.75±32.56a	1 687.58±98.35ab	11 624.45±235.78ab	23 220.24±1 870.85ab
S4	3 375.55±90.12a	6 075.50±159.05c	9 450.45±112.85d	16 200.75±235.58b	3 712.45±133.45a	2 236.75±90.56d	3 577.50±77.50d	1 012.50±111.05a	1 080.85±43.55d	10 360.45±135.65bc	22 410.55±689.55b

S0: 0 kg(S)·hm^{-2}; S1: 40 kg(S)·hm^{-2}; S2: 80 kg(S)·hm^{-2}; S3: 120 kg(S)·hm^{-2}; S4: 160 kg(S)·hm^{-2}。同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column indicate significant differences at P < 0.05 level.

表 2　硫肥用量对玉米不同生育时期地上部植株全硫积累量的影响

Table 2　Effect of sulfur application amount on shoot sulfur accumulation of maize at different growth stages　　kg·hm^{-2}

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Large bell stage	抽雄吐丝期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage						
					叶片 Blade	叶鞘 Sheath	茎秆 Stem	苞叶 Husk	穗轴 Spike-stalk	籽粒 Grain	总量 Total
S0	9.77±0.08d	11.80±0.17b	15.51±0.12c	17.64±0.28d	3.97±0.05e	2.35±0.07b	1.70±0.03e	0.86±0.02b	0.65±0.01c	8.93±0.09d	19.89±0.24c
S1	11.24±0.22c	11.92±0.63b	19.31±0.75b	23.32±1.04b	4.93±0.07c	2.28±0.03b	3.08±0.04c	0.67±0.01c	0.82±0.03a	12.55±0.14b	25.70±0.09a
S2	14.73±0.51a	15.33±0.29a	22.06±0.76a	27.28±0.92a	4.53±0.08d	3.40±0.02a	4.39±0.05a	1.37±0.12a	0.68±0.04b	15.23±0.12a	28.46±0.10a
S3	13.12±0.31b	14.72±0.49a	16.27±0.35c	22.45±0.36b	5.41±0.12b	1.56±0.09d	2.56±0.29d	0.85±0.01b	0.70±0.03b	12.77±0.22b	22.80±1.02b
S4	8.53±0.09e	8.78±0.57c	11.92±0.38d	20.86±0.23c	6.42±0.14a	1.84±0.10c	2.68±0.07b	0.76±0.03bc	0.42±0.01d	10.66±0.08c	21.92±0.43bc

S0: 0 kg(S)·hm^{-2}; S1: 40 kg(S)·hm^{-2}; S2: 80 kg(S)·hm^{-2}; S3: 120 kg(S)·hm^{-2}; S4: 160 kg(S)·hm^{-2}。同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column indicate significant differences at P < 0.05 level.

表 3　硫肥用量对玉米不同生育时期硫吸收强度的影响

Table 3　Effect of sulfur application amount on sulfur uptake rate of maize at different growth stages　　g·hm^{-2}·d^{-1}

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Large bell stage	抽雄吐丝期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage
S0	191.57±32.92cd	173.55±2.11c	172.35±16.78c	189.52±3.31c	170.76±1.51d
S1	220.46±9.40bc	175.40±5.54c	214.57±0.94b	213.94±12.95b	191.76±5.87b
S2	288.84±13.12a	225.57±0.84a	245.10±6.90a	237.89±7.63a	212.44±5.23a
S3	257.16±36.60ab	216.47±9.22b	225.84±9.05b	206.00±13.59b	180.11±6.48c
S4	167.32±1.15d	158.98±2.02d	132.52±2.02d	191.39±5.53c	163.59±6.14d

S0: 0 kg(S)·hm^{-2}; S1: 40 kg(S)·hm^{-2}; S2: 80 kg(S)·hm^{-2}; S3: 120 kg(S)·hm^{-2}; S4: 160 kg(S)·hm^{-2}。同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column indicate significant differences at P < 0.05 level.

表 4　硫肥用量对玉米不同生育时期地上部植株全氮积累量的影响

Table 4　Effect of sulfur application amount on shoot nitrogen accumulation of maize at different growth stages　　kg·hm^{-2}

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Large bell stage	抽雄吐丝期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage						
					叶片 Blade	叶鞘 Sheath	茎秆 Stem	苞叶 Husk	穗轴 Spike-stalk	籽粒 Grain kernel	总量 Total
S0	81.67±1.77b	81.68±2.33c	137.73±2.15d	189.00±3.78b	28.35±2.35b	12.35±1.83bc	12.65±0.18c	3.73±0.19d	4.62±0.24bc	153.15±1.43c	217.75±12.63c
S1	59.40±1.45d	128.25±2.25a	164.70±5.54b	229.50±3.93a	30.38±1.63b	18.75±1.87b	18.50±1.75a	3.73±0.18d	6.02±0.19a	175.05±8.50b	263.25±10.13b
S2	89.78±2.78a	102.60±6.45b	189.55±9.77a	225.45±5.92a	41.18±1.82a	25.65±0.68a	19.55±0.75a	4.83±0.24b	4.69±0.11c	224.80±10.21a	309.70±11.35a
S3	91.80±1.22a	134.33±6.33a	189.85±8.23a	191.03±23.65b	29.03±1.98b	8.90±0.55d	13.72±1.15b	5.37±0.17a	5.00±0.09b	175.45±3.89b	255.40±9.73b
S4	74.95±1.08c	102.60±5.40b	143.78±1.46c	189.67±16.85b	38.48±1.53a	12.95±1.48cd	13.34±0.50c	4.14±0.18c	2.87±0.17d	125.33±8.35d	201.75±14.12c

S0: 0 kg(S)·hm^{-2}; S1: 40 kg(S)·hm^{-2}; S2: 80 kg(S)·hm^{-2}; S3: 120 kg(S)·hm^{-2}; S4: 160 kg(S)·hm^{-2}。同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。Different letters within the same column indicate significant differences at P < 0.05 level.

表 5 硫肥用量对玉米不同生育时期氮吸收强度的影响

Table 5 Effect of sulfur application amount on nitrogen uptake rate in maize at different growth stages kg·hm^{-2}·d^{-1}

处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Large bell stage	抽雄吐丝期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage
S0	1.60±0.02b	1.2±0.09d	1.53±0.03c	1.74±0.06c	1.64±0.06c
S1	1.59±0.01b	1.51±0.04c	1.83±0.04c	1.91±0.06b	1.89±0.03b
S2	1.76±0.23ab	1.89±0.01b	2.10±0.02a	2.06±0.02a	2.23±0.01a
S3	1.81±0.10a	1.97±0.06a	2.10±0.13a	1.75±0.01c	1.83±0.06b
S4	0.97±0.07c	1.51±0.03c	1.60±0.06c	1.74±0.09c	1.53±0.02d

S0: 0 kg(S)·hm^{-2}; S1: 40 kg(S)·hm^{-2}; S2: 80 kg(S)·hm^{-2}; S3: 120 kg(S)·hm^{-2}; S4: 160 kg(S)·hm^{-2}。同列不同字母表示差异显著。Different letters within the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level.

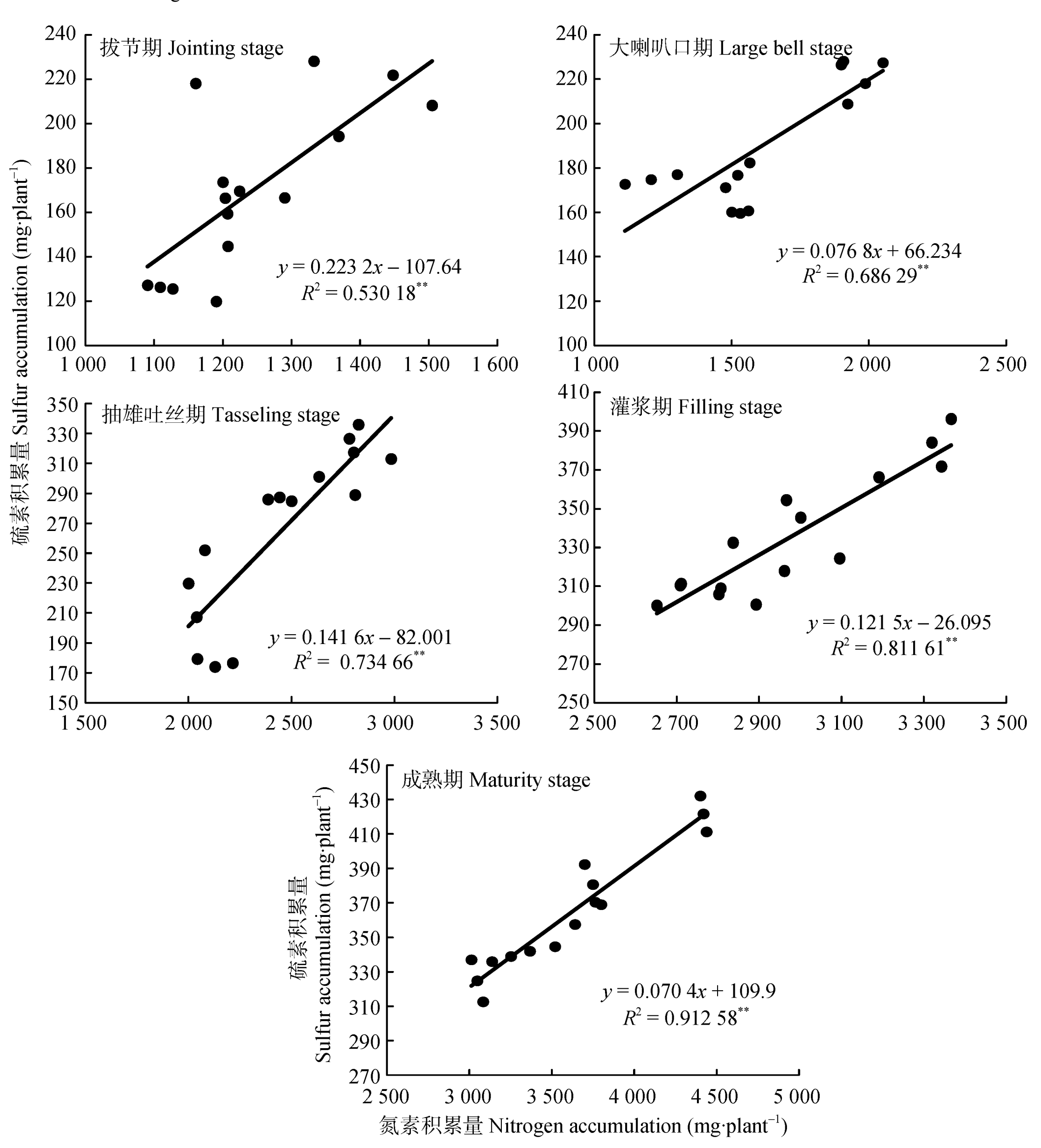


图 1 玉米各生育时期氮积累量与硫积累量的相关分析(*n*=15)

Fig. 1 Relationships between nitrogen accumulation amount and sulfur accumulation amount in maize at at different growth stages (*n*=15)

表示在 1%水平差异显著。 mean significant at the 1% probability level.

2.4 玉米硫素积累量与氮素积累量的相关性分析

不同生育时期玉米硫素积累量与氮素积累量均不相同，以氮素积累量为横坐标，硫素积累量为纵坐标绘图得出各生育时期相关性回归曲线表明，玉米硫素积累量与氮素积累量的相关系数随着生育时期的推进而逐渐增大，成熟期时达到最大值。经统计分析表明，各生育时期玉米硫素积累量与氮素积累量均达显著正相关关系(P<0.01)。

2.5　硫素对玉米产量及硫素利用率的影响

由表 6 可知, 随着施硫量的增加玉米产量呈先增加后下降的变化趋势, 当施硫量为 S2 时玉米产量达到最大值, 为 12 978.3 kg·hm^{-2}, 显著高于 S0 和 S1 处理, 但与 S3、S4 处理差异未达显著水平。硫肥偏生产力和硫肥利用率均随着施硫量的增加而减小, 在施硫量为 S1 处理时均达最大值, 且显著高于其他处理。硫肥农学利用率随着施硫量的增加呈现先增加后下降的趋势, 当施硫量为 S2 处理时达最大值, 除 S1 处理外均显著高于其他施硫处理。

表 6　硫肥用量对玉米产量和硫肥利用的影响
Table 6　Effect of sulfur application amount on yield and sulfur utilization in maize

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm^{-2})	硫肥偏生产力 Sulfur partial productivity (kg·kg^{-1})	硫肥利用率 Sulfur use productivity (%)	硫肥农学利用率 Sulfur agronomic efficiency (kg·kg^{-1})
S0	10 989.1±19.24 c	—	—	—
S1	11 756.9±18.23bc	293.92±32.32a	27.1±1.01a	19.2±7.79ab
S2	12 978.3±41.21a	162.23±8.52b	16.9±0.81b	24.86±0.79a
S3	12 400.1±20.14ab	103.33±3.29c	6.7±0.92c	11.76±1.80bc
S4	12 228.7±23.12ab	103.34±4.67c	4.5±0.33d	7.74±1.60c

3　结论与讨论

硫素作为植物生长所需的第4大营养元素, 是植物体内合成氨基酸(例: 半胱氨酸、蛋氨酸)的重要成分。土壤中的硫含量是影响植物生长发育和产量形成的重要因素[15-16]。近年来, 土壤缺硫现象已经被广泛报道[17]。因此, 适当施用硫肥是提高作物产量的重要措施。大量研究表明, 土壤施用适量的硫肥可使作物增产 10%~25%[18-19]。李娜等[20]在有效硫含量为13.3 mg·kg^{-1}的土壤上进行不同施硫水平对玉米产量的影响试验,结果表明, 当施硫量在 37.5~112.5 kg·hm^{-2} 时, 玉米籽粒产量增加 8.94%~22.05%, 当施硫量增加至150 kg·hm^{-2}时, 玉米籽粒产量呈下降趋势。本研究供试土壤含硫量为 16.27 mg·kg^{-1}, 处于潜在缺硫水平, 增施硫肥能够显著提高玉米产量, 增产幅度为7.0%~18.1%。且当施硫量为80 kg·hm^{-2}时, 玉米产量达最大值, 为 12 978.3 kg·hm^{-2}, 显著高于不施硫处理, 但进一步增加硫肥用量, 产量呈下降趋势。玉米高产的保障是植株充足的物质积累, 玉米籽粒产量与植株干物质积累量呈显著正相关[21], 且早期研究结果表明氮肥和硫肥的配合施用将提高作物的干物质积累量[22], 并促进同化产物向籽粒的转运[23], 本研究结果与前人研究结果相一致。并且本研究进一步明确了当施硫量为40~120 kg·hm^{-2}时, 玉米干物质积累量在整个生育过程中均保持较高水平, 并且提高了玉米籽粒占全株干物质的百分比。

大量研究均表明, 适当施硫能够提高玉米硫素积累量[4,20]。本研究认为当施硫量为80 kg·hm^{-2}时, 各生育时期玉米硫素积累量较不施硫处理提高 29.92%~54.64%。且在拔节期、抽雄吐丝期, 玉米硫素吸收强度出现2个高峰。我们认为这是因为抽雄吐丝期玉米由营养生长转入生殖生长, 使得玉米对硫素的需求量增加。玉米植株对硫肥的吸收量直接影响着硫肥偏生产力和硫肥农学利用效率。李娜等[20]研究表明玉米硫肥偏生产力、硫肥农学利用率均随着施硫量的增加而减小。本研究与前人研究结果一致, 且探明了当施硫量为80 kg·hm^{-2}时, 硫肥农学利用率达到最大值, 继续增加施硫量, 硫肥农学利用率呈下降趋势。说明过量施用硫肥将造成硫素浪费, 且可能会对玉米产生毒害作用。当施硫量为 80 kg·hm^{-2}时, 玉米硫素积累量和产量均达最大。说明在最适施硫水平下, 硫素的吸收量和供给量处于较为合理的状态。此外, 在最适施硫水平下, 玉米不同部位的硫素积累量差异显著。玉米籽粒硫积累量最高、叶片和茎秆次之, 苞叶和穗轴积累量最低。说明施用硫肥促进了各营养器官的硫素向籽粒运转, 提高玉米籽粒产量, 进而提高了玉米硫肥农学利用率。王空军等[5]、王晓燕等[24]研究表明, 各生育时期叶片硫积累量最高、籽粒次之。这可能是由于不同品种对元素吸收及转化能力的差异造成的。

在植物代谢过程中, 硫、氮存在着紧密的联系, 其生理生化功能与同化途径密切相关[25-26]。伍利[27]研究表明, 当施硫量为60 kg·hm^{-2}时可促进小麦开花期氮、硫素积累、转运及其对籽粒的贡献率。本研究表明当施硫量为80 kg·hm^{-2}时, 玉米氮素积累量达最大值, 继续增加施硫量会抑制玉米对氮素的吸收。在最适施硫水平下, 玉米成熟期各部位氮素积累量存在显著差异, 具体表现为籽粒氮积累量最高, 叶片、叶鞘和茎秆次之, 苞叶和穗轴积累量最

低。由此可见，施用硫肥促进玉米对氮素的吸收也是使玉米籽粒产量和干物质积累量提高的重要原因之一，同时也说明硫氮互作是提高玉米产量和肥料利用效率的重要原因。周杰等[6]研究表明，氮素和硫素在适量范围内，二者存在互相促进作用，供应水平过高，则相互抑制，对作物生长发育不利。王东等[28]研究认为，小麦植株的氮素积累量与硫素积累量呈极显著正相关。本研究也证实了玉米氮素积累量与硫素积累量存在极显著的正相关关系，且随着生育时期的推进，相关系数逐渐增大。

总之，我们通过施用不同水平的硫肥试验证明，在施用硫肥为80~120 kg·hm^{-2}时，能够促进玉米对硫素及氮素的吸收，实现玉米增产。这对当地的玉米生产栽培具有重要的参考价值。

参考文献 References

[1] 刘洋，石慧清，龚月桦. 硫氮配施对持绿型小麦氮素运转及叶片衰老的影响[J]. 西北植物学报，2012，32(6): 1206–1213
Liu Y, Shi H Q, Gong Y H. Effects of sulfur and nitrogen fertilizer combination on nitrogen transfer and leaf senescence in stay-green wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(6): 1206–1213

[2] 王利，高祥照，马文奇，等. 中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(6): 1219–1226
Wang L, Gao X Z, Ma W Q, et al. Sulphur consumption in Chinese agriculture: Situation and outlook[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6): 1219–1226

[3] Caviglia O P, Melchiori R J M, Sadras V O. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops[J]. Field Crops Research, 2014, 168: 27–37

[4] 谢瑞芝，董树亭，胡昌浩，等. 不同基因型玉米硫素吸收利用效率的研究Ⅱ. 硫素吸收利用的基因型差异[J]. 作物学报, 2004, 30(1): 52–59
Xie R Z, Dong S T, Hu C H, et al. The difference of sulfate uptake and utilization in maize (*Zea mays* L.) Ⅱ. The difference genotypes in absorption and utilization of sulfate[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(1): 52–59

[5] 王空军，胡昌浩，董树亭. 夏玉米硫素吸收与时空分布研究[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 899–904
Wang K J, Hu C H, Dong S T. The sulfur absorption and spatio-temporal distributing in high-yield summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26(6): 899–904

[6] 周杰，王东，满建国，等. 高氮条件下硫氮互作对冬小麦幼苗生长及氮、硫吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 42–51
Zhou J, Wang D, Man J G, et al. Effects of interaction of nitrogen and sulfur on seedling growth, uptake and utilization of nitrogen and sulfur of winter wheat under high nitrogen conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 42–51

[7] 李惠民，王保莉. 玉米硫素营养状况及应用研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(4): 16–21
Li H M, Wang B L. Research progress on maize sulfur nutrition status and its utilization[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2008, 10(4): 16–21

[8] 赵玉霞，周芳，李雪芳，等. 氮硫配施对冬小麦氮硫吸收转运及利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报，2014，22(9): 1020–1028
Zhao Y X, Zhou F, Li X F, et al. Effects of nitrogen and sulfur interaction on their accumulation, translocation and use efficiency in winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1020–1028

[9] 刘松忠，何洪巨，冯固，等. 氮、硫供应对章丘大葱生长和含硫有机物含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(4): 884–889
Liu S Z, He H J, Feng G, et al. Effect of N and S supply on the growth and organo-sulfur compounds of Zhangqiu spring onion[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 884–889

[10] 刘松忠，陈清，冯固，等. 氮硫供应对大葱含硫有机物及其代谢关键酶活性的影响[J]. 西北农业学报，2010，19(6): 148–152
Liu S Z, Chen Q, Feng G, et al. Effects of nitrogen and sulfur supply on sulfur-containing compounds and activities of key enzymes for sulfur metabolism in Chinese spring onion[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(6): 148–152

[11] 刘勤. 氮形态和硫水平对烤烟氮、硫、钾等营养的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1171–1174
Liu Q. Effects of nitrogen forms and sulphur rate on nitrogen, sulphur and potassium nutrition of tobacco[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1171–1174

[12] 张昌爱，张民，曾跃春. 硫对石灰性土壤化学性质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1453–1458
Zhang C A, Zhang M, Zeng Y C. Effects of sulfur on chemical properties of calcareous soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1453–1458

[13] Rahman M M, Soaud A A, Al Darwish F H, et al. Effects of sulfur and nitrogen on nutrients uptake of corn using acidified water[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(42): 8275–8283

[14] Rahman M M, Soaud A A, Al Darwish F H, et al. Growth and nutrient uptake of maize plants as affected by elemental sulfur and nitrogen fertilizer in sandy calcareous soil[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(60): 12882–12889

[15] 王东，于振文，王旭东. 硫肥对冬小麦硫素吸收分配和产量的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 791–793
Wang D, Yu Z W, Wang X D. Effect of sulfur fertilizer on sulfur absorption and distribution and yield of winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 791–793

[16] Ahmad A, Abraham G, Abdin M Z. Biochemical evaluation of sulfur and nitrogen assimilation potential of mustard (*Brassica juncea* L. Czern. & Coss.) under application of

slow-release sulfur fertilizer[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2001, 96(1): 167–172
[17] Lakkineni K C, Abrol Y P. Sulphur requirement of crop plants, physiological analysis[J]. Fertiliser News, 1994, 39(3): 11–18
[18] Fitzgerald M A, Ugalde T D, Anderson J W. Sulphur nutrition affects delivery and metabolism of S in developing endosperms of wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(360): 1519–1526
[19] 王国平, 向鹏华, 曾惠宇, 等. 不同供硫水平对烟叶产、质量的影响[J]. 作物研究, 2009, 23(1): 35–37
Wang G P, Xiang P H, Zeng H Y, et al. Effect of different sulphur application rates on leaf yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Crop Research, 2009, 23(1): 35–37
[20] 李娜, 杨阳, 赵玉霞, 等. 施用硫肥对关中地区夏玉米硫素吸收及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 168–172
Li N, Yang Y, Zhao Y X, et al. Effects of sulfur application rate on sulfur utilization and grain yield of summer maize in Guanzhong Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 168–172
[21] 朱从桦, 张嘉莉, 王兴龙, 等. 硅磷配施对低磷土壤春玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 725–735
Zhu C H, Zhang J L, Wang X L, et al. Effects of combined application of silicon and phosphorus fertilizers on dry matter accumulation and distribution and grain yield of spring maize in low phosphorus soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 725–735
[22] 王丽, 王东, 周杰, 等. 氮硫互作对冬小麦旗叶衰老、产量和氮素利用效率的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1476–1488
Wang L, Wang D, Zhou J, et al. Interactive effects of nitrogen and sulfur on flag leaf senescence, yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1476–1488
[23] 谢迎新, 刘超, 朱云集, 等. 氮、硫配施对冬小麦氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 64–71
Xie Y X, Liu C, Zhu Y J, et al. Effects of nitrogen and sulfur combined application on nitrogen use efficiency and grain yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(1): 64–71
[24] 王晓燕, 姜雯, 张洪生. 不同时期施硫对夏玉米硫积累和籽粒品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(30): 131–134
Wang X Y, Jiang W, Zhang H S. Effects of sulphur supply at different stages on the sulphur accumulation and grain quality of summer maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(30): 131–134
[25] Koprivova A, Suter M, den Camp R O, et al. Regulation of sulfate assimilation by nitrogen in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology, 2000, 122(3): 737–746
[26] Tabe L M, Droux M. Limits to sulfur accumulation in transgenic lupin seeds expressing a foreign sulfur-rich protein[J]. Plant Physiology, 2002, 128(3): 1137–1148
[27] 伍利. 硫氮配施对冬小麦物质积累转运及产量的调控效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010: 38–40
Wu L. Study on regulation of sulfur and nitrogen fertilizer combined application on material accumulation and remobilization yield in winter wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010: 38–40
[28] 王东, 桑晓光, 周杰, 等. 不同类型冬小麦氮、硫积累分配及利用效率的差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(22): 4587–4597
Wang D, Sang X G, Zhou J, et al. Differences in accumulation and distribution and use efficiency of nitrogen and sulfur in different types of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(22): 4587–4597